

지진공학 실무 활용을 위한 한국형 광대역 하이브리드 지반 운동 시뮬레이션

Broadband Hybrid Ground Motion Simulation for Earthquake Engineering Applications in South Korea

김재휘¹⁾ · Bae, Sung Eun²⁾ · Bradley, Brendon A.³⁾ · 정석호^{4)*}

Kim, Jaehwi¹⁾ · Bae, Sung Eun²⁾ · Bradley, Brendon A.³⁾ · Jeong, Seokho^{4)*}

¹⁾University of Canterbury 토목공학과 박사과정, ²⁾QuakeCoRE/University of Canterbury 수석프로그래머, ³⁾University of Canterbury 교수, ⁴⁾창원대학교 토목공학과 조교수

¹⁾Graduate Student, Department of Civil and Natural Resources Engineering, University of Canterbury, ²⁾Specialist Scientific Programmer, QuakeCoRE/University of Canterbury, ³⁾Professor, Department of Civil and Natural Resources Engineering, University of Canterbury, ⁴⁾Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Changwon National University

/ A B S T R A C T /

Being in a stable continental region (SCR) with a limited history of instrumentation, South Korea has not collected sufficient instrumental data for data-driven ground motion models. To address this limitation, we investigated the suitability of the hybrid ground motion simulation method that Graves and Pitarka (2010, 2015) proposed for simulating earthquake ground motions in South Korea. The hybrid ground motion simulation method used in this study relies on region-specific parameters to accurately model phenomena associated with the seismic source and the wave propagation. We initially employed relevant models and parameters available in the literature as a practical approach. We incorporated a three-dimensional velocity model developed by Kim et al. (2017) and a one-dimensional velocity model presented by Kim et al. (2011) to account for the crustal velocity structure of the Korean peninsula. To represent the earthquake source, we utilized Graves and Pitarka's rupture generator algorithm along with a magnitude-area scaling relationship developed for SCR by Leonard (2014). Additionally, we assumed the stress and attenuation parameters based on studies of regional seismicity. Using the implemented platform, we simulated the 2016 Mw5.57 Gyeongju earthquake and the 2017 Mw5.4 Pohang earthquake. Subsequently, we compared results with recorded accelerations and an empirical ground motion prediction equation at strong motion stations. Our simulations had an overall satisfactory agreement with the recorded ground motions and demonstrated the potential of broadband hybrid ground motion simulation for engineering applications in South Korea. However, limitations remain, such as the underestimation of long-period ground motions during the 2017 Pohang earthquake and the lack of a model to predict the ground motion amplification associated with the near-surface site response accurately. These limitations underscore the importance of careful validation and refinement of region-specific models and parameters for practically implementing the simulation method.

Key words: Earthquake, Strong ground motion, Ground motion simulation, Ground motion prediction, Seismic hazard

1. 서론

2016년 경주 지진, 2017년 포항 지진 등의 사례는 국내에서 발생하는 중 규모 지진에 의해서도 실질적인 피해가 발생할 수 있음을 보였다. 또한 위 사례들에서 강한 진동에 의한 구조물 파괴 및 손상, 액상화로 인한 지반 침하 및

측방 유동을 포함한 상당한 규모의 피해가 보고되었으며, 이를 계기로 신리성 높은 내진 설계의 중요성이 널리 알려지게 되었다[1-3].

우리나라의 경우, 내진설계일반(KDS 17 10 00)을 통해 체계적인 내진 성능 기준, 설계 요건, 그리고 설계 고려사항 등을 제시하고 있다[4]. 설계 대상 시설물의 중요도에 따라 내진 등급 및 성능 수준이 분류되며, 이에 따라 내진 등급별 설계 지반운동의 평균 재현 주기가 결정된다. 그리고 행정 구역별로 제시된 지진 구역 계수와 평균 재현 주기별로 제시된 위험도 계수의 곱으로써 유효 수평 지반가속도가 정의되고, 이에 지반 특성에 따라 주기별 증폭 계수를 적용함으로써 지진 재해 및 지반 운동 특성이 고려된 내진 설계가 가능하다.

*Corresponding author: Jeong, Seokho

E-mail: seokho.jeong@changwon.ac.kr

(Received November 12, 2024; Revised December 8, 2024; Accepted December 9, 2024)

일반적으로 지반 운동 특성은 관측 지진 자료를 활용한 지반운동 예측식 개발(Ground Motion Prediction Equation, GMPE)로부터 정량화된다[5]. 판경계에 위치한 강진 지역에서는 다양한 규모를 갖는 다수의 지진 기록을 활용하여 경험적 지반운동 예측식을 개발 및 활용하고 있다. 그러나 일반적으로 지진원 인근에서 관측된 강지진동 자료는 부족한 실정이며, 이러한 데이터에 기반하여 개발된 GMPE는 강진 발생시 근거리의 지반운동 특성을 적절히 예측하지 못하는 한계를 가진다[6]. 한편, 우리나라는 비교적 작은 규모의 지진이 낮은 빈도로써 발생하는 안정 대륙권(Stable Continental Region)에 속하여 지진 연구 및 실무 과정에서 활용할 수 있는 관측 지진 자료가 절대적으로 부족한 실정이며, 국내 활용을 위한 GMPE의 개발은 자료 부족으로 인해 많은 어려움을 동반한다.

다른 자연 현상과 달리 지진은 발생 빈도가 절대적으로 낮다. 자료 부족의 문제는 정도의 차이가 있을 뿐 안정 대륙권 뿐만 아니라 강진 지역에서도 존재한다. 관측 지진 자료 부족 문제의 대안으로 활용하기 위해, 시뮬레이션을 통한 지반운동 생성 방법 연구가 전 세계적으로 활발히 이루어지고 있다. Hartzell[7]과 Irikura[8]은 소규모 지진 기록에서 얻은 경험적 그린 함수(Green's function)를 활용하여 강진을 모델링하는 방법을 제시하였다. 이후 Boore[9]의 지진원 및 경로 효과에 대한 확률론적 표현과 Zeng et al.[10]의 전체 파형에 대한 이론적 그린 함수가 시뮬레이션 방법에 포함되었다. 그리고 Hartzell et al.[11]는 확률론적, 경험적, 그리고 이론적 방법으로부터 합성된 광대역 시간 이력과 실제 강진 기록을 비교함으로써 해당 방법을 검증하였다. 그 후 저진동수 영역과 고진동수 영역을 구분하여 계산한 후 합성하는 광대역 하이브리드 합성 방법이 다수 연구자들에 의해 제시되었다 [12-14].

광대역 하이브리드 지반운동 시뮬레이션 방법은 다수의 연구자에 의해 활발히 검증되고 있다[13-18]. 기술 발전에 따른 장비의 고도화로부터 향상된 계산 능력이 이를 뒷받침하고 있으며 다년간 축적된 지진 기록들로부터 지반 운동 물리에 대한 이해 또한 지반운동 시뮬레이션의 급진적인 발전에 힘을 실고 있다[19, 20]. Bradley et al.[19]은 물리 기반 지반운동 시뮬레이션의 공학 실무 활용 지침을 제시하였으며, 실제로 지반운동 시뮬레이션 결과가 확률론적 지진 재해 평가 및 지반운동 예측식 개발에 활용된 사례가 있다[21-23].

우리나라의 경우 또한 다수 연구자들에 의해 지반운동 시뮬레이션을 활용한 지반운동 생성 및 검증이 수행된 바 있다. Kim et al.[24]는 미국 남부 캘리포니아 지진센터(Southern California Earthquake Center, SCEC)로부터 구축된 강지진동 모사 플랫폼(Broadband Platform, BBP)을 활용하여 한반도 강진의 감쇠 특성을 분석하였다. 그러나 Kim et al.[24]의 연구는 해당 지반운동 시뮬레이션의 검증 과정을 포함하지 않으며, 지각 전파 모델로써 미국 중동부 및 서부 모델을 적용하였다. Lee et al.[25]는 SPECFEM3D 패키지[26]를 활용하여 한반도 3차원 속도 모델에 대해 2016년 경주 지진을 대상으로 지반운동 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 이를 관측 지진 자료와 비교함으로써 검증하였고, 모멘트 규모(M_w) 6.0, 6.5, 그리고 7.0 지진 시나리오에 대한 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 그러나 Lee et al.[25]의 연구는 1 Hz 이하의 진동수 영역에 한정된 지반운동 시뮬레이션을 수행하였으며, 지반 최대속도만을 비교함으로써 검증하였다. 이와 같은 선행 연구 사례로부터, 우리나라 지반 특성을 고려한 지각 모델이 적용된 광대역 시뮬레이션 및 다양한 강도 지표와의 비교를 통한 폭넓은 검증 과정의 필요성을 확인하였다.

본 연구에서는 관측 지진 자료 부족의 문제의 대안으로 Graves and Pitarka[13, 14]의 광대역 하이브리드 지반운동 시뮬레이션에 기초한 한국형 지반운동 시뮬레이션 플랫폼을 구현하였다. 우리나라의 지반 특성을 반영하기 위해 국내를 대상으로 개발된 속도 모델을 적용하였으며, 선행 연구를 참조하여 지진원 및 시뮬레이션 입력 변수를 가정하였다. 시뮬레이션 플랫폼의 활용 가능성을 검토하기 위해 2016년 경주 지진과 2017년 포항 지진을 대상으로 지반운동 시뮬레이션을 수행하고, 각 시뮬레이션으로부터 생성된 가속도 시간 이력과 실제 지진 사례로부터 기록된 가속도 시간 이력을 비교하였다. 그리고 가속도 시간 이력으로부터 지반 운동의 세기를 표현하는 지표들을 계산 및 비교하였으며, 이를 우리나라의 지진 자료로부터 개발된 지반운동 예측식과 비교함으로써 시뮬레이션의 성능을 확인하였다.

본 연구에서는 관측 지진 자료 부족의 문제의 대안으로 Graves and Pitarka[13, 14]의 광대역 하이브리드 지반운동 시뮬레이션에 기초한 한국형 지반운동 시뮬레이션 플랫폼을 구현하였다. 우리나라의 지반 특성을 반영하기 위해 국내를 대상으로 개발된 속도 모델을 적용하였으며, 선행 연구를 참조하여 지진원 및 시뮬레이션 입력 변수를 가정하였다. 시뮬레이션 플랫폼의 활용 가능성을 검토하기 위해 2016년 경주 지진과 2017년 포항 지진을 대상으로 지반운동 시뮬레이션을 수행하고, 각 시뮬레이션으로부터 생성된 가속도 시간 이력과 실제 지진 사례로부터 기록된 가속도 시간 이력을 비교하였다. 그리고 가속도 시간 이력으로부터 지반 운동의 세기를 표현하는 지표들을 계산 및 비교하였으며, 이를 우리나라의 지진 자료로부터 개발된 지반운동 예측식과 비교함으로써 시뮬레이션의 성능을 확인하였다.

2. 연구 방법

2.1 지반운동 시뮬레이션

광대역 하이브리드 지반운동 시뮬레이션 방법은 별도로 수행된 저진동수 영역 시뮬레이션과 고진동수 영역 시뮬레이션을 하나의 시간 이력으로 결합하는 시뮬레이션 방법이다[11]. 3차원 파동방정식의 해를 직접적으로 계산하는 저진동수 영역 시뮬레이션의 경우 최대 진동수가 높아질 경우 요구되는 계산 자원이 기하급수적으로 증가하므로 저진동수 영역 시뮬레이션의 최대 진동수는 1 Hz 내외로 설정하는 것이 일반적이다.

Graves and Pitarka[13, 14]의 광대역 하이브리드 지반 운동 시뮬레이션은 Fig. 1과 같이 (1) 지진원 모델링 (2-a) 저진동수 영역 시뮬레이션 (2-b) 고진동수 영역 시뮬레이션 (3) 광대역 가속도 시간 이력 생성의 과정으로 수행된다.

지진원은 시뮬레이션의 가정 및 목적에 따라 점 지진원(Point Source) 또는 단층 파열 위치 및 단층 기하를 고려한 운동학적 유한단층, 즉 면적 지진원(Area Source)으로 모델링이 가능하다. 면적 지진원 모델링을 위해서는 길이(Length), 너비(Width), 주향각(Strike), 경사각(Dip), 그리고 면선각(Rake) 등의 지진원 모델링 입력 변수를 활용하여 실제 단층 파열 형상을 모

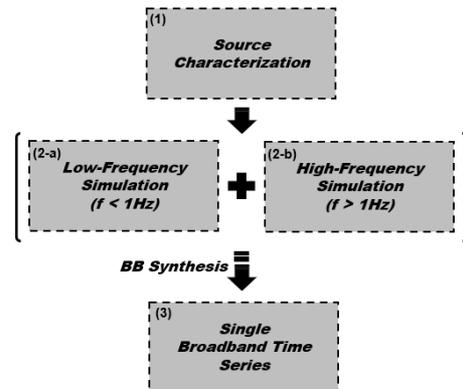


Fig. 1. Workflow of broadband hybrid ground motion simulation

사할 수 있다.

본 연구에 적용된 Graves and Pitarka[13, 14]의 광대역 하이브리드 지반운동 시뮬레이션은 1 Hz를 기준으로 각 진동수 영역의 시뮬레이션에 서로 다른 접근법을 적용한다. 저진동수 영역 시뮬레이션은 이론적으로 표현되는 단층 파열 및 파동 전파 효과에 대한 결정론적(Deterministic) 방법으로 수행된다[12-14]. 3차원 지각 속도 구조를 고려한 3차원 점탄성 유한 차분 알고리즘[27]을 적용함으로써 파동방정식의 해를 계산하며 전단파 속도(V_s)에 대한 전단파 감쇠상수(Q_s) 및 압축파 감쇠상수(Q_p) 관계식을 통해 비탄성 감쇠를 고려하였다. 고진동수 영역 시뮬레이션에는 반 추계학적 방법(Semi-stochastic method)을 적용하였다. 반 추계학적 방법은 단층 파열로 인한 에너지 방사에 대한 추계학적 접근법과 간단한 파동 전파와 산란 효과 이론을 결합한 방법을 의미한다. 고진동수 영역 시뮬레이션은 모델링한 지진원을 Brune[28]의 무작위 위상 지진원 스펙트럼으로써 가정한 다수의 하위 단층으로 나누어 각각의 응답을 계산한 후, 이를 1차원 속도 모델로부터 계산된 간소화된 그린 함수에 따라 합산하는 과정으로 수행된다. 이때, 주기 영역 비선형 증폭 계수를 적용함으로써 해석 대상 위치의 지반 특성 및 그로 인한 부지 효과를 반영할 수 있다. 해당 비선형 증폭 계수는 Campbell and Bozorgnia[29]의 지표 하 30 m 평균 전단파 속도(V_{S30}) 기반의 경험적 증폭 함수에 기반하고 있다. Campbell and Bozorgnia[29]의 증폭 함수는 결정론적 접근법, 즉 저진동수 영역 시뮬레이션 계산 과정에 포함되는 깊은 분지에 의한 증폭과 지역별 지반 특성에 의한 증폭을 별도로 고려함으로, 중복된 증폭 보정을 방지할 수 있다. 각 위치의 증폭 함수는 위치별 V_{S30} 및 기반암 전단파 속도에 기반하여 결정된다. 결정된 증폭 함수는 저진동수 영역 및 고진동수 영역 시뮬레이션 결과에 각각 적용되며, 이후 4차 버터워스 필터를 적용한 합성 과정을 통해 하나의 광대역 시간 이력으로서 결합된다[13, 14].

2.2 시뮬레이션 대상 지진 및 지역

본 연구를 통해 구현된 한국형 광대역 지반운동 시뮬레이션 플랫폼의 성능은 시뮬레이션으로 생성된 가속도 시간 이력과 지진 관측 가속도 시간 이력의 비교를 통해 검증될 수 있다. 시뮬레이션을 효과적으로 검증하기 위해서는 고밀도의 지진 관측 장비를 통해 기록된 다수의 고품질 지진 파형 자료가 필요하다. 본 연구에서는 비교적 최근 발생한 2016년 경주 지진(M_w 5.57)과 2017년 포항 지진(M_w 5.4)을 시뮬레이션 대상 지진으로 설정하였으며, Fig. 2와 같이 약 500×600×60 km³의 범위를 갖는 한반도 남부 일대 영역을 시뮬레이션 대상 지역으로 설정하였다. 경주 지진과 포항 지진 당시 기상청(KMA), 지질자원연구원(KIGAM), 그리고 원자력 안전 연구원(KINS)에서 운용 중이었던 지진 관측소를 Fig. 2에 함께 표시하였으며, 설치 형태는 지표(압반 및 토층) 관측소와 시추공 관측소로 구성되어 있다.

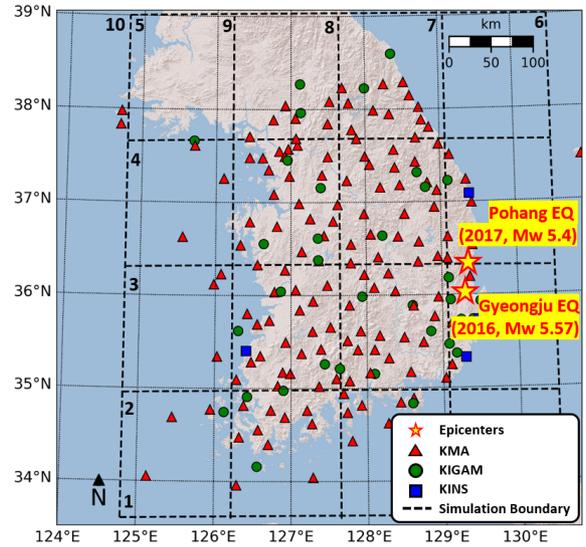


Fig. 2. Locations of simulated earthquakes and seismic stations

2.3 시뮬레이션 적용 입력 변수 및 속도 모델

본 연구에서는 한국과학기술연구원(KISTI)에서 운용 중인 5호기 슈퍼컴퓨터 누리온(NURION)을 활용하여 광대역 하이브리드 지반운동 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 입력 변수인 감쇠상수(Q_s , Q_p) 및 스펙트럼 감쇠상수(α), 그리고 응력 강하(Stress Drop, $\Delta\sigma$)는 선행 연구를 참조하여 각각 $Q_s = 150 V_s$, $Q_p = 2Q_s$, $\Delta\sigma = 5.0 MPa$, 그리고 $\alpha = 0.016$ 으로 가정하였다[30, 31].

중규모 이상의 지진 시뮬레이션에서 점 지진원 모델링의 적용은 비교적 넓은 단층 파열 면적에서 방출되는 복잡한 에너지의 전파 형태를 적절히 묘사하지 못하며, 해석 대상 지진의 영향을 과소평가할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 각 지진원을 Graves and Pitarka[13, 14]의 유한 단층 알고리즘을 적용한 면적 지진원으로써 Fig. 3과 같이 모델링하였다. 이때, Slip은 단층에서 발생하는 상대 변위, Rise time은 단층 파열 시작-종료 시간, 그리고 Rake는 단층에서의 변위 방향-수평 방향 각도를 의미한다. 실제 지진 사례의 단층 기하를 적절히 묘사하기 위해 지진 분석 보고서 및 참조문헌을 참고하여 Table 1과 같이 각 지진의 지진원 모델링 입력 변수를 설정하였다. 단층 파열 면적은 Leonard[32, 33]의 안정 대륙권에 속하는 판 내부지역의 모멘트 규모-단층 면적 관계식으로 추정하였다.

Campbell and Bozorgnia[29]의 V_{S30} 기반 경험적 증폭 함수는 기반암과 지표 사이의 관계로써 개발된 것에 반해, 우리나라가 운용 중인 지진 관측소는 2.2절에서 서술한 바와 같이 지표(압반 및 토층) 또는 시추공에 설치되어 적용 시 실제와 다른 응답의 형태를 보일 수 있다. 따라서 본 연구에서는

Table 1. Source modeling parameters for the 2016 Gyeongju earthquake and the 2017 Pohang earthquake simulations

Event	Origin time	Moment magnitude	Epicenter latitude [°]	Epicenter longitude [°]	Depth [km]	Strike [°]	Dip [°]	Rake [°]
Gyeongju	16-09-12 20:32:54	5.57	35.755	129.193	14	24	70	171
Pohang	17-11-15 14:29:31	5.4	36.109	129.366	5	230	69	152

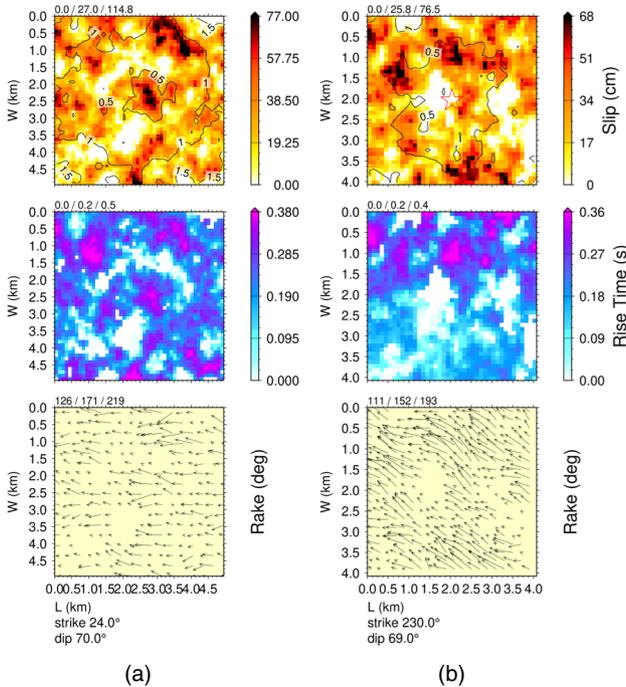


Fig. 3. Generated finite fault models for the (a) 2016 Gyeongju earthquake and (b) 2017 Pohang earthquake

지반운동 시뮬레이션 과정에서 각 위치의 지반 특성으로 인한 부지 증폭 효과는 고려하지 않았으며, 이에 따라 시뮬레이션을 통해 생성된 가속도 시간 이력은 암반 지표에서의 지진파로 가정하였다.

본 연구에서 활용한 광대역 하이브리드 지반 운동 시뮬레이션은 2.1 절에서 서술한 바와 같이 각 진동수 영역 시뮬레이션에 서로 다른 접근법을 적용하므로 저진동수 영역 시뮬레이션에는 3차원 속도 모델, 고진동수 영역 시뮬레이션에는 1차원 속도 모델의 적용이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 저진동수 영역 지반운동 시뮬레이션을 위해 Kim et al.[34]의 3차원 한반도 남부 지각 속도 모델을 적용하였으며, 고진동수 영역 지반운동 시뮬레이션에는 Kim et al.[35]의 1차원 속도 모델을 적용하였다.

Kim et al.[34]의 3차원 한반도 남부 지각 속도 모델은 고밀도의 지진 관측소에서 기록된 747개의 지진으로부터 수집한 약 20,000개의 P파 도착 시간 자료를 활용하여 개발되었다. 해당 속도 모델은 약 460×640×72 (X×Y×Z) km³에 해당하는 한반도 남부 전역에 걸친 지각 속도 정보를 포함하고 있으며 수평 방향으로 10 km, 수직 방향으로 4 km 간격의 그리드를 가진다. Fig. 4는 Fig. 2에 표시된 7번 단면에서의 속도 구조를 보여준다. 해당 모델을 시뮬레이션 상에 구현할 때는 각 방향에 대해 0.1 km의 간격으로 업샘플링(Upsampling)하였다.

Kim et al.[35]은 실제 지진의 광대역 파형 자료를 대상으로 전체 그리드 검색(Full Grid Search) 과정을 수행하여 남한 내 세 구역(옥천 지대, 경기 육괴, 그리고 경상 분지)에 대한 1차원 속도 모델을 결정하였다. 본 연구의 경우, 2.2절에서 언급한 바와 같이 경주 지진과 포항 지진에 대한 지반운동 시뮬레이션을 대상으로 하므로 고진동수 영역 지반운동 시뮬레이션에는 경상 분지 1차원 속도 모델을 적용하였다(Table 2). 해당 모델은 지표로부터 상부 지각 경계에 해당하는 깊이 3.56 km까지 $V_p=5.34$ km/s의 단일 층으로 가정되어 있다. 이는 해당 모델이 1 km 이내의 천부 지각에서는

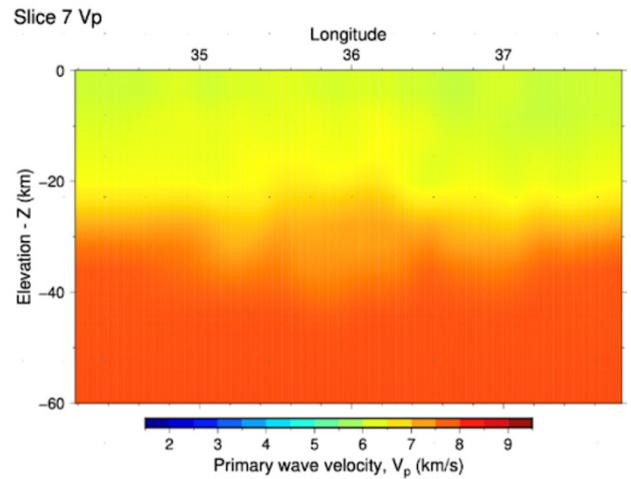


Fig. 4. Primary wave velocity structure of slice 7 in the Figure 2

Table 2. Gyeongsang basin 1-D velocity model (Kim et al.[35])

Crustal boundary depth (km)	Upper-middle	3.56
	Middle-lower	12.0
	Moho	34.0
P-Wave velocities (km/s)	Crustal average	6.19
	Upper crust	5.34
	Middle crust	5.91
	Lower crust	6.44
	Upper mantle	8.05

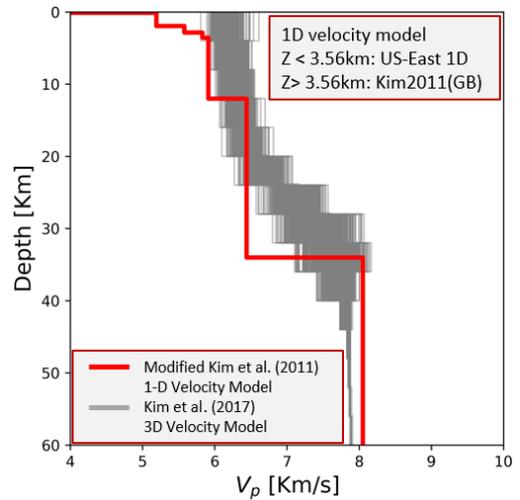


Fig. 5. Implemented velocity models for the hybrid broadband ground motion simulation

실제보다 상당히 높은 압축파 속도를 가질 수 있고, 이로부터 시뮬레이션 과정에서 실제와 다른 응답 결과를 보일 수 있음을 의미한다. 따라서, 본 연구에서는 Kim et al.[35]의 1차원 속도 모델의 3.56 km 이상 깊이 지층에 북미 동부의 1차원 속도 모델을 결합하여 적용하였다. Fig. 5는 각 진동수 영역 지반운동 시뮬레이션에 적용된 속도 모델을 보여주며, Kim et al.[34]의 3차원 한반도 남부 지각 속도 모델은 전체 2,944 그리드 위치에서의 압축파 속도를 함께 표시하였다.

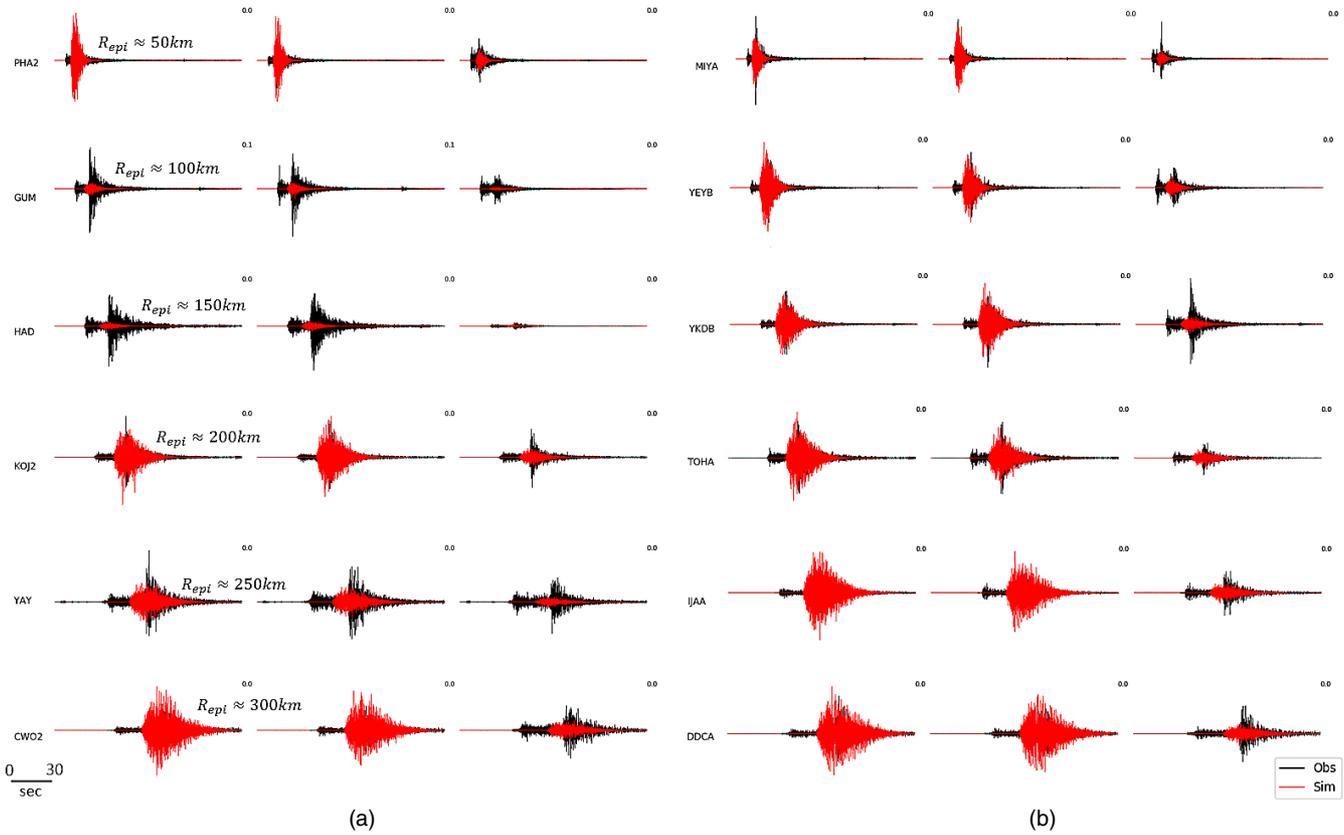


Fig. 6. Comparison of simulated and observed acceleration time series of the 2016 Gyeongju earthquake at (a) surface stations and (b) borehole stations

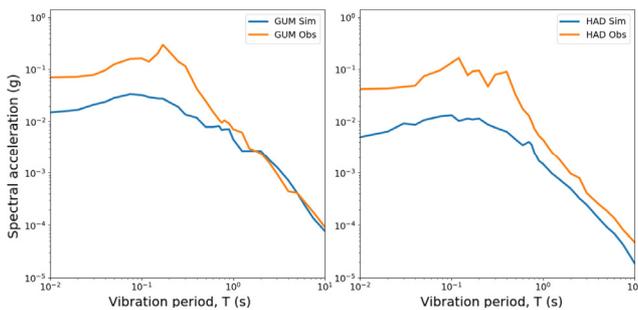


Fig. 7. Comparison of observed and simulated response spectra of the 2016 Gyeongju earthquake at stations GUM and HAD

3. 지반운동 시뮬레이션 결과

3.1 2016년 경주 지진(ML 5.8)

지반운동 시뮬레이션의 결과와의 비교를 위해, 경주 지진의 사례에서 연구 대상 지역 내 89개의 관측소에서 기록된 지진 파형 자료를 획득하였다. 이 중 지표 관측소는 53개소, 그리고 시추공 관측소는 36개소이다. Fig. 6은 경주 지진을 대상으로 하는 광대역 하이브리드 지반운동 시뮬레이션의 결과로부터 생성된 가속도 시간 이력 및 관측 가속도 시간 이력의 일부를 보여준다. 진앙으로부터의 거리에 대한 지진파 도달시간의 영향을 확인하기 위해 약 50 km 간격의 거리에 위치하는 관측소의 기록 지진 파형과 시뮬레이션 결과

를 비교하였다. 이때, 지표에 설치된 관측소에서의 부지 응답의 영향을 구분하여 확인하기 위해 유사한 진앙 거리에 위치하는 두 지진 관측소를 대상으로 설치 형태에 따라 각각 (a) 지표 관측소와 (b) 시추공 관측소로 분리하여 표시하였다.

Fig. 6으로부터 지반운동 시뮬레이션을 통해 생성된 가속도 시간 이력은 진앙 거리가 멀어짐에 따라 도달시간이 길어지는 것을 확인하였다. 그리고 대다수의 관측소에서의 비교 결과로부터 광대역 하이브리드 지반운동 시뮬레이션이 가속도 시간 이력을 전반적으로 잘 예측함을 확인하였다. 한편, 시추공 관측소의 경우, 시뮬레이션을 통해 관측 자료와 유사한 가속도 시간 이력의 생성이 가능하였으나, 일부 지표형 관측소는 관측 기록이 시뮬레이션 대비 매우 큰 PGA를 보임을 확인하였다.

지표 관측소에서 확인된 파형의 차이를 분석하기 위해, 구미(GUM) 관측소와 하동(HAD) 관측소를 대상으로 시뮬레이션 및 관측 기록으로부터 주기별 응답 스펙트럼을 계산하였으며 Fig. 7과 같이 표시하였다. 구미(GUM) 관측소와 하동(HAD) 관측소에서의 응답 스펙트럼 비교 결과로부터, 관측 기록의 응답 스펙트럼이 시뮬레이션 생성 결과로 계산된 응답 스펙트럼보다 1초 이하의 주기 영역에서 상당히 큰 것을 확인하였다. Kim[36]의 ‘지진관측 증폭효과 보정을 위한 지역별 지표영향 연구. 최종보고서’에 제시된 구미(GUM) 관측소와 하동(HAD) 관측소의 Vs30는 각각 652 m/s와 836 m/s로 비교적 큰 Vs30 값을 보임에도 불구하고 실제 관측 기록은 시뮬레이션 대비 단주기 영역에서 매우 큰 값을 가짐을 확인하였다. Cho et al.[37]의 ‘Site flatfile of Korea meteorological administration’s seismic stations in Korea’로부터 구미(GUM) 관측소와 하동(HAD) 관

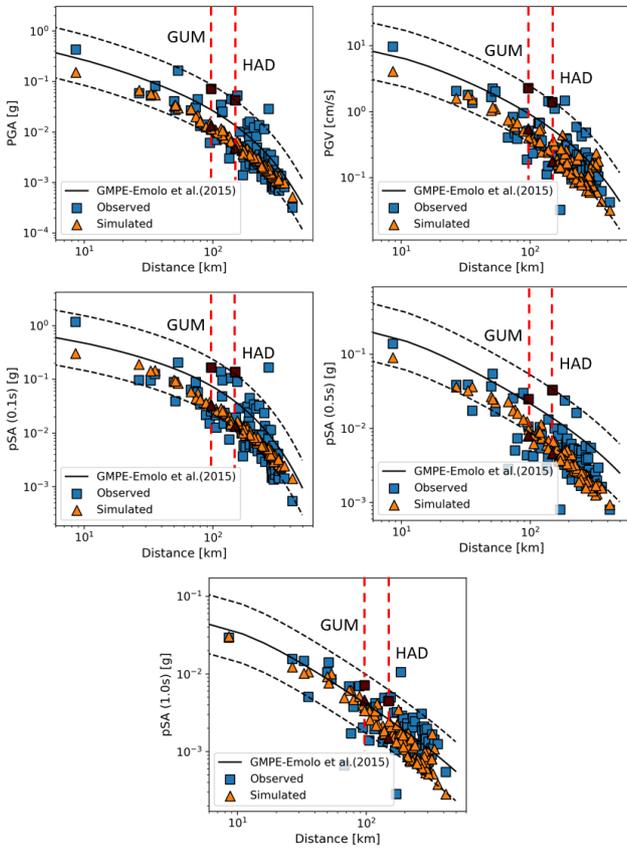


Fig. 8. Ground motion intensities predicted by a GMPE and obtained from simulated and recorded ground motions of the 2016 Gyeongju earthquake

측소의 기반암 깊이는 각각 14 m와 18 m임을 확인하였으며, 이로부터 해당 지표형 관측소에서의 관측 가속도 시간 이력은 얇은 토층 또는 풍화대의 부지 효과에 의해 단주기 영역에서 크게 증폭되었을 수 있을 것으로 판단하였다.

광대역 하이브리드 지반운동 시뮬레이션의 예측 성능을 평가하기 위해, 각 지진 관측소에서 기록된 가속도 시간 이력으로부터 지반 최대가속도 (Peak Ground Acceleration, PGA), 지반 최대속도(Peak Ground Velocity, PGV), 그리고 주기별 가속도 응답스펙트럼(Pseudo Spectral Acceration, pSA)를 계산하였다. 시뮬레이션 결과로 계산된 PGA와 pSA를 각각 관측 자료와 비교하여 Fig. 8과 같이 거리의 함수로 표시하였으며, 국내 지진 자료에 기반한 Emolo et al.[38]의 한반도 남부 GMPE의 예측값 또한 같이 비교하였다. 이때 본 연구는 2.3절에서 서술한 바와 같이 지반운동 시뮬레이션 과정에서 지반 특성으로 인한 부지 증폭 효과를 고려하지 않았으므로 Emolo et al.[38]이 제시한 부지 효과를 고려하지 않은 GMPE를 적용하였다. 또한, 단주기 영역 응답스펙트럼에서 큰 차이가 확인된 구미(GUM) 관측소와 하동(HAD) 관측소의 결과는 비교 결과를 구분하여 표시하였다.

Fig. 8로부터, 관측 기록으로부터 계산된 PGA, PGV, pSA(0.1s), pSA(0.5s), 그리고 pSA(1s) 값은 Emolo et al.[38]의 GMPE 예측값 및 편차 범위와 큰 차이가 없음을 확인하였다. 시뮬레이션의 결과로부터 계산된 PGA, PGV, pSA(0.1s), 그리고 pSA(0.5s)는 작은 분산을 보이며 GMPE 예측 범위 내에 분포하였으나 GMPE 중간값에 비해 다소 낮음을 확인하였다. 그러나 시뮬레이션 기반 pSA(1.0s)는 다른 주기의 pSA에 비해

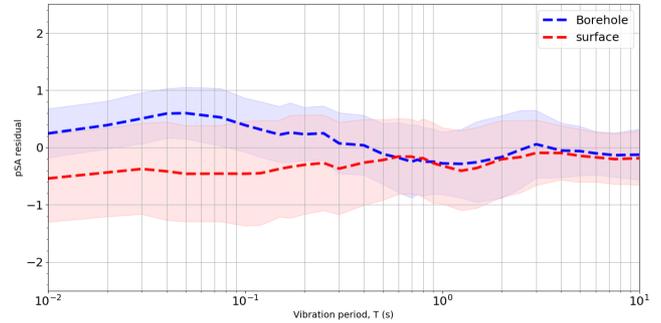


Fig. 9. Computed pSA residuals of the 2016 Gyeongju earthquake simulation at the surface and borehole stations

GMPE 및 관측 기록 기반 pSA(1.0s)와 비교적 유사하였다. 이와 같은 차이는 본 연구가 부지 증폭 효과로 인한 단주기 영역의 증폭이 고려되지 않은 일반 지표 지진파를 생성한 것에 의한 것으로 판단되며, 단주기 증폭에 대한 영향은 주기가 커짐에 따라 감소하여 pSA(1.0s)는 GMPE와 유사한 형태를 보이는 것으로 판단된다.

광대역 하이브리드 지반운동 시뮬레이션 결과의 예측 성능 및 경향을 확인하기 위해 경주 지진 시뮬레이션 검증 과정에서 활용된 모든 관측소를 대상으로 응답 스펙트럼에서의 주기별 잔차 분포를 확인하였다. 이를 위해 시뮬레이션 대상 범위 내 89개 지진 관측소의 기록 가속도 시간 이력과 시뮬레이션 생성 가속도 시간 이력의 응답 스펙트럼을 각각 계산하였다. 계산된 응답 스펙트럼으로부터, 시뮬레이션 기반 계산 결과와 관측 기록 기반 계산 결과의 로그 차를 써 주기별 잔차를 구하였다. 지진 관측소의 설치 형태에 따라, 지표 관측소(53개소)와 시추공 관측소(36개소)로 구분하여 잔차를 계산하였다. 계산 결과를 바탕으로 주기 별 평균 잔차를 구하고 Fig. 9에 68%의 신뢰구간과 함께 표시하였다. 지반운동 시뮬레이션은 본래 지표 지진파를 예측하는 것을 목적으로 하며, 따라서 시추공 관측 기록보다는 큰 지반운동을 생성할 수 있다. Fig. 9로부터 본 연구에서 활용한 광대역 하이브리드 지반운동 시뮬레이션은 관측소 설치 형태에 따라 0.5초 이하의 주기 영역에서 서로 다른 예측 경향을 보임을 확인하였다. 시추공 관측소의 경우, 0.5초 이하의 주기 영역에서 시뮬레이션 결과가 관측 기록보다 평균적으로 큰 값을 가지는 것을 확인하였다. 그러나, 지표 관측소에서는 해당 주기 영역에서 시뮬레이션이 관측 기록을 과소평가하였으며 시추공 관측소 대비 큰 분산을 보였다. 이와 같은 결과는 Fig. 7 및 Fig. 8에서 확인한 바와 같이, 본 연구에서 부지 효과로 인한 단주기 영역 지반운동 증폭이 반영되지 않은 일반 지표 지진파를 생성함으로 인한 것으로 판단하였다.

3.2 2017년 포항 지진(ML 5.4)

포항 지진의 경우, 시뮬레이션 대상 범위 내 103개의 관측소에서 기록된 지진 파형 자료를 획득하였다. 이 중 지표 관측소는 57개소, 그리고 시추공 관측소는 46개소이다. Fig. 10은 포항 지진 시뮬레이션의 가속도 시간 이력 및 관측소에서 기록된 가속도 시간 이력의 일부를 보여준다. 진앙으로부터의 거리에 대한 지진파 도달시간의 영향을 확인하기 위해 약 40 km 간격의 거리에 위치하는 관측소의 기록 지진 파형과 시뮬레이션 결과를 Fig. 10과 같이 비교하였다. 포항 지진 시뮬레이션의 결과 또한 지표 관측소 부지 응답

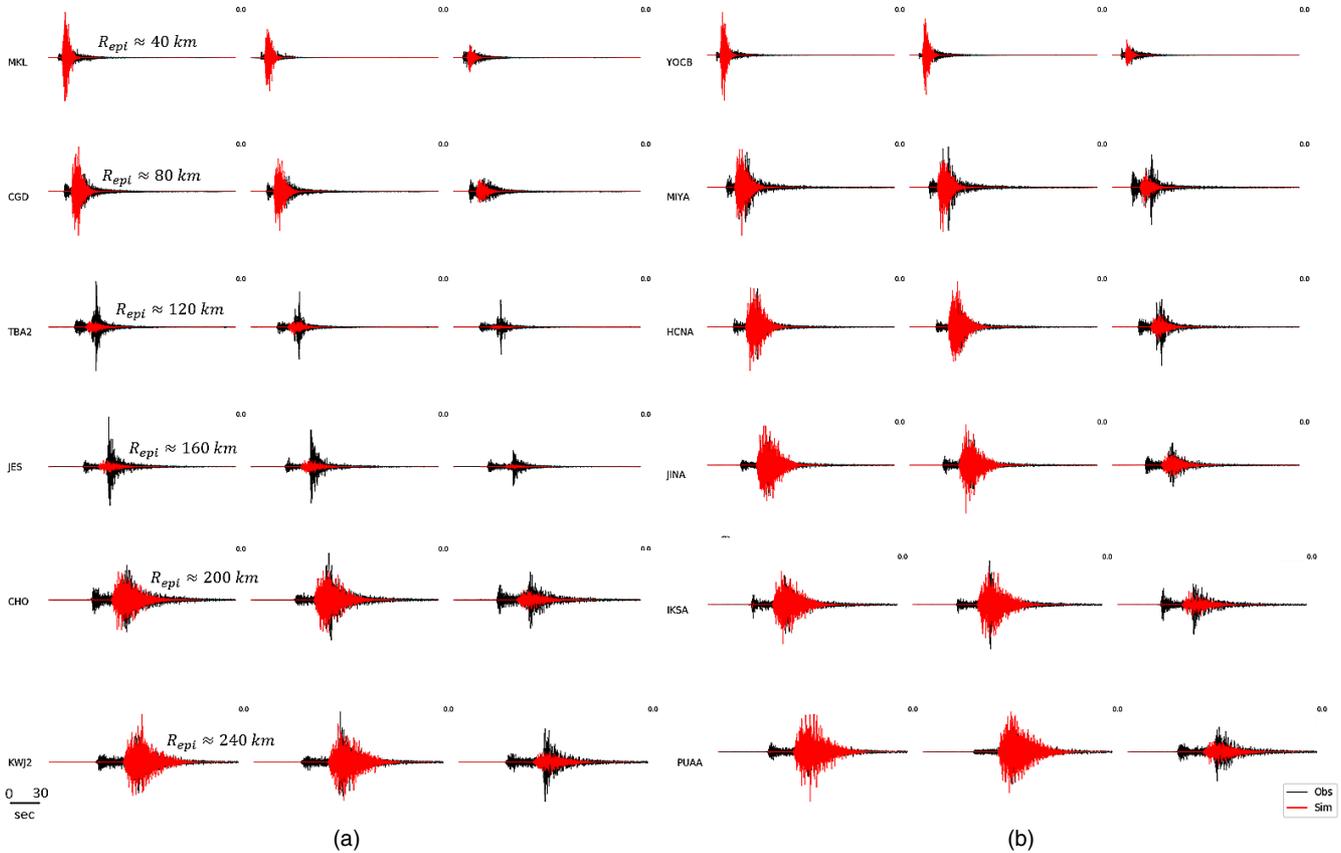


Fig. 10. Comparison of simulated and observed acceleration time series of the 2017 Pohang earthquake at (a) surface stations and (b) borehole stations

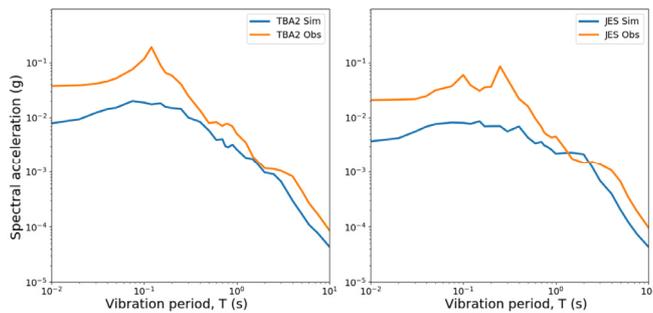


Fig. 11. Comparison of observed and simulated response spectra of the 2017 Pohang earthquake at stations TBA2 and JES

의 영향을 구분하여 확인하기 위해 유사한 진앙 거리에 위치하는 두 지진 관측소를 대상으로 설치 형태에 따라 각각 (a) 지표 관측소와 (b) 시추공 관측소로 분리하여 표시하였다.

포항 지진 시뮬레이션 또한 경주 지진 결과와 같이 시뮬레이션으로 생성된 가속도 시간 이력은 진앙 거리가 멀어짐에 따라 도달시간이 늦어지는 것을 확인하였다. 그리고 대다수의 관측소에서의 시뮬레이션과 관측 기록이 전반적으로 유사한 진폭, 도달시간 및 지속 시간을 보임을 확인하였다. 포항 지진 시뮬레이션의 경우에도, 시추공 관측소에서는 유사한 가속도 시간 이력이 지반운동 시뮬레이션을 통해 생성되었으나 일부 지표형 관측소에서는 관측 가속도 시간 이력 대비 작은 PGA를 갖는 가속도 시간 이력이 생성된 것을 확인하였다.

일부 지표형 관측소에서 확인된 가속도 시간 이력의 차이를 분석하기 위해, 태백(TBA2) 및 정선(JES) 관측소를 대상으로 시뮬레이션과 관측 기록의 주기별 응답 스펙트럼을 계산하여 Fig. 11과 같이 표시하였다. 태백 관측소와 정선 관측소에서의 응답 스펙트럼은 경주 지진 시뮬레이션의 사례 및과 유사하게 1초 이하의 주기 영역에서 시뮬레이션과 관측 기록이 큰 차이를 보이는 것을 확인하였다. Kim[36]의 ‘지진관측 증폭효과 보정을 위한 지역별 지표 영향 연구. 최종보고서’에 따르면 태백(TBA2) 관측소와 정선(JES) 관측소는 각각 586 m/s와 1,873 m/s로 비교적 큰 Vs30을 가짐을 확인하였다. Cho et al.[37]의 ‘Site flatfile of Korea meteorological administration’s seismic stations in Korea’로부터 확인된 태백(TBA2) 관측소의 기반암 깊이는 2 m이며, 정선(JES) 관측소의 기반암 깊이는 제시되어 있지 않아 확인이 불가능했다. 이로부터 경주 지진 시뮬레이션의 경우와 같이 해당 관측소에서는 천부 토층 및 풍화암층의 부지 효과가 단주기 영역의 지반 운동을 크게 증폭시켜 관측 기록이 시뮬레이션 대비 매우 큰 값을 가지는 것으로 판단하였다.

광대역 하이브리드 지반운동 시뮬레이션의 예측 성능을 평가하기 위해, 각 지진 관측소에서 시뮬레이션 및 관측 기록으로부터 PGA, PGV, 그리고 주기별 pSA를 계산하였다. Fig. 12와 같이 시뮬레이션 결과와 관측 기록로부터 계산된 PGA, PGV, 그리고 pSA를 각각 거리에 대한 함수로 표시하고, 태백(TBA2) 관측소와 정선(JES) 관측소의 비교 결과는 구분하여 표시하였다. Emolo et al.[38]의 한반도 남부 GMPE의 예측값 또한 같이 비교하였다.

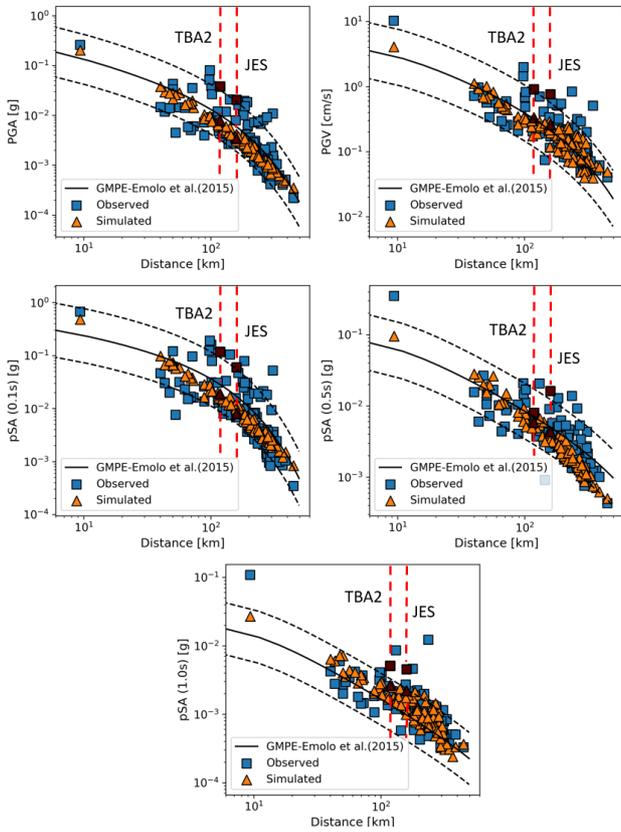


Fig. 12. Ground motion intensities predicted by a GMPE and obtained from simulated and recorded ground motions of the 2017 Pohang earthquake

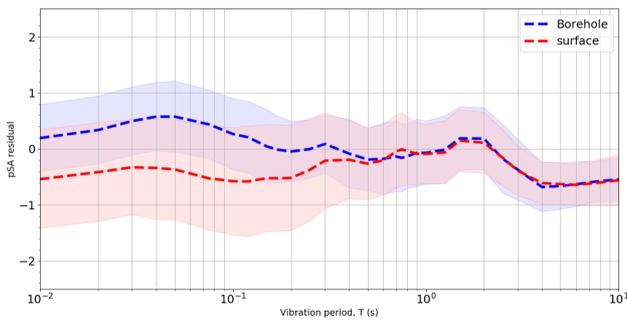


Fig. 13. Computed pSA residuals of the 2017 Pohang earthquake simulation at the surface and borehole stations

Fig. 12에서, 관측 기록의 PGA, PGV, pSA(0.1s), pSA(0.5s), 그리고 pSA(1s) 값은 GMPE 예측값 및 편차 범위와 큰 차이가 없음을 확인하였다. 한편, 시뮬레이션 결과로부터 계산된 PGA 및 PGV 그리고 0.1s, 0.5s에서의 pSA는 경주 지진 시뮬레이션 결과와 유사하게 작은 분산을 가지며 GMPE 예측 범위 내에 분포하나 GMPE 중간값에 비해 다소 낮은 값을 보였다. 1s에서의 pSA는 시뮬레이션이 GMPE 및 관측 기록과 유사한 분포를 보임을 확인하였다. 이와 같은 결과는 경주 지진의 경우와 마찬가지로 본 연구가 부지 증폭으로 인한 단주기 영역 증폭을 고려하지 않은 암반 지표 지진 파를 생성함에 기인하며, 단주기 증폭의 영향은 주기가 커짐에 따라 감소하여 pSA(1.0s)는 GMPE와 유사한 형태를 보이는 것으로 판단된다.

포항 지진 시뮬레이션 결과 또한 모든 관측소를 대상으로 응답 스펙트럼

에서의 주기별 잔차를 확인함으로써 지반운동 시뮬레이션의 예측 성능 및 경향을 확인하였다. 이를 위해 시뮬레이션 대상 범위 내 103개 지진 관측소에서 가속도 관측 기록과 시뮬레이션의 응답 스펙트럼을 각각 계산하였다. 계산된 응답 스펙트럼으로부터 시뮬레이션 결과와 관측 기록의 로그 차로써 주기별 잔차를 구하였다. 지표 관측소(57개소)와 시추공 관측소(46개소)로 구분하여 각 주기별 평균 잔차를 계산하였으며 이를 Fig. 13에 68%의 신뢰 구간과 함께 표시하였다. 관측소 설치 형태에 따라 0.5초 이하의 주기 영역에서의 서로 다른 예측 경향을 보이는 것을 포함 지진의 경우에서도 확인하였다. 시뮬레이션으로 생성된 지표 지진파 결과는 0.5초 이하의 주기 영역에서 평균적으로 시추공 관측 기록에 비해 크게 나타났으며, 해당 주기 영역에서 지표 관측 기록보다는 평균적으로 작은 것으로 나타났다. 또한 지표 관측소에서의 잔차는 시추공 관측소 대비 큰 분산을 보이는데, 이는 지표 지반운동이 지표층 지반운동 증폭 현상으로 시추공 대비 더 큰 분산을 보이기 때문으로 판단된다. 경주 지진 시뮬레이션 결과와 같이 이러한 결과는 본 연구가 부지 효과로 인한 단주기 영역 지반운동 증폭을 반영하지 않은 것에 기인한 것으로 판단된다. 한편, 포항 지진 시뮬레이션 결과의 경우 지표 관측소와 시추공 관측소 모두 2s 이상의 영역에서 스펙트럴 가속도를 과소평가하였다. 포항 지진의 경우 진원 깊이가 얇고 관측 지진파에 장주기 표면파가 강하게 나타나고 있는데 이번 연구에서 저진동수 영역 시뮬레이션에 적용된 Kim et al.[34]의 3차원 지각 속도 모델의 경우 해상도가 충분하지 않아 천부 지각에서의 발생하는 파의 산란, 굴절, 간섭 및 표면파의 발생을 적절히 반영하지 못할 수 있으며, 포항 지진의 경우 고압수의 주입으로 인한 촉발 지진 이므로 본 연구에서 가정된 단층 지진원 거동이 실제와 상이하여 시뮬레이션이 관측 지진파를 과소평가할 가능성도 존재한다.

4. 결론

본 연구는 한국형 광대역 하이브리드 지반운동 시뮬레이션 플랫폼의 구현과 검증 과정을 포함하고 있다. Graves and Pitarka[13, 14]의 광대역 하이브리드 지반운동 시뮬레이션을 활용하여 시뮬레이션 플랫폼을 구축하였으며, 우리나라의 지반 운동 특성을 적절히 반영하기 위해 Kim et al.[34]의 한반도 남부 3차원 지각 속도 모델과 Kim et al.[35]의 경상 분지 1차원 속도 모델을 적용하였다. 또한 선행 연구를 참조하여 감쇠 상수 및 응력 강하 등의 시뮬레이션 입력 변수를 가정하였으며, 지반운동 시뮬레이션 결과와 실제 관측 지진 기록의 가속도 시간이력 및 PGA, PGV, 그리고 주기별 pSA 계산 결과와 비교함으로써 시뮬레이션의 예측 성능을 검증하였다. 2016년 경주 지진과 2017년 포항 지진을 대상으로 검증 과정이 수행되었으며, 이때 각 지진의 단층 기하를 적절히 모사하기 위해 문헌 자료를 참조하여 지진원을 모델링하였다. 지반운동 시뮬레이션 플랫폼의 검증은 우리나라의 지진 관측소 설치 형태를 고려하여 지표형 관측소와 시추공형 관측소를 구분하여 수행되었으며, 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 2016년 경주 지진과 2017년 포항 지진 시뮬레이션의 결과로부터 대다수의 관측소에서 유사한 지진파의 도달 시간 및 지속 시간, 그리고 지진 파형을 확인하였다. 이로부터 시뮬레이션 과정에 적용된 속도 모델 및 입력 변수 등이 적절하게 반영되었음을 확인하였으며, 본 연구를 통해 구현

된 한국형 광대역 하이브리드 지반운동 시뮬레이션 플랫폼의 양호한 예측 성능을 확인하였다.

- 2) 일부 지표형 관측소에서는 시뮬레이션이 관측 가속도 기록을 크게 과소 평가하였다. 해당 관측소에서의 시뮬레이션과 관측 기록의 응답 스펙트럼이 1초 이하의 주기 영역에서 큰 차이를 보임을 확인하였다. 해당 관측소들은 비교적 큰 $Vs30$ 를 가짐에도 불구하고 천부층 부지 효과로 인해 지반 운동이 단주기 영역에서 크게 증폭된 것으로 판단된다.
- 3) 시뮬레이션 및 관측 가속도 시간 이력으로부터 PGA, PGV, pSA(0.1s), pSA(0.5s), 그리고 pSA(1s)을 각각 계산하였다. 그리고 해당 결과를 한반도 남부를 대상으로 개발된 GMPE와 비교하여 시뮬레이션 결과의 예측 경향을 확인하였다. 시뮬레이션은 대부분의 경우 작은 분산과 함께 GMPE 예측 범위 내에 들어왔으나 GMPE 중간값 보다 다소 낮은 값을 보였다. 그러나 1s에서는 pSA가 GMPE 및 관측 기록과 유사한 값을 보였다. 이 결과는 본 연구에 적용된 시뮬레이션이 부지 증폭 효과를 고려하지 않아 단주기 증폭의 영향을 고려하지 못함에 인한 것으로 판단된다.
- 4) 각 시뮬레이션 결과를 대상으로 관측 기록 대비 가속도 응답 스펙트럼의 잔차를 계산하였다. 시뮬레이션 범위 내에 포함되는 전체 관측소를 대상으로 관측소 설치 형태에 따라 구분하여 전체 평균 잔차를 계산하였다. 설치 형태에 따라 특정 주기 이하 영역에서 서로 다른 예측 경향을 보임을 확인하였으며 시추공 관측소의 경우, 시뮬레이션이 0.5s 이하 주기 영역에서 관측 기록 대비 스펙트럴 가속도를 과대평가함을 확인하였다. 그러나 지표 관측소의 경우, 시뮬레이션 결과는 관측 기록 대비 스펙트럴 가속도를 과소평가하였으며, 시추공 관측소 대비 큰 편차를 보였다.
- 5) 본 연구에서 구현된 광대역 하이브리드 지반운동 시뮬레이션은 경주 및 포항 지진에 의한 전국 관측소의 지진파를 전반적으로 잘 재현하고 있으나, 일부 지표 관측소에서 부지 효과 및 그로 인한 특정 주기 영역에서의 지반운동 증폭을 고려하지 못함을 확인하였다. 이 결과는 우리나라의 지진 관측소 설치 형태에 맞는 지반운동 증폭 모델의 개발 및 적용이 필요함을 의미한다. 또한 후속 연구를 통해 정교화된 속도 모델을 적용함으로써, 본 지반운동 시뮬레이션 플랫폼을 활용한 보다 정확한 지진파의 생성이 가능할 것으로 판단된다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 한국연구재단을 통해 과학기술정보통신부의「해의우수과학자 유치사업」의 지원(RS-2021-NR055399) 및 국가초고성능컴퓨팅센터로부터 초고성능컴퓨팅 자원과 기술지원(KSC-2021-CRE-0597)을 받아 수행되었음.

/ REFERENCES /

1. Sun CG. Seismological and geotechnical characteristics of the 12 september 2016 Gyeongju earthquake. *The Magazine of The KSCE*, 2017;65(4):14-19.
2. Lee CH, Kim SY, Park JH, Kim DK, Kim TJ, Park KH. Comparative analysis of structural damage potentials observed in the 9.12 Gyeongju and 11.15 Pohang earthquakes. *J Earthq Eng Soc Korea*, 2018;22(3):175-184.
3. Kim JC, Shin SH, Oh SH. Damage Investigation of pilotis structures and analysis of damage causes by Pohang earthquake. *J Arch Institute Kor Str & Const*, 2019;35(3):3-10.
4. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). Korea Seismic Design Standard (KDS 17 10 00). Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea (in Korean); c2018.
5. Baker J, Bradley B, Stafford, P. Seismic hazard and risk analysis. Cambridge University Press; c2021.
6. Douglas J. Ground motion prediction equations 1964-2018. Review, University of Strathclyde, Glasgow; c2018.
7. Hartzell SH. Earthquake aftershocks as Green's functions. *Geophysical Research Letters*, 1978;5(1):1-4.
8. Irikura K. Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function. InProc. 7th Japan Earthq Eng Symp. 1986;151:151-156.
9. Boore DM. Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. *Bull Seismol Soc Am*, 1983;73(6A):1865-1894.
10. Zeng Y, Anderson JG, Yu G. A composite source model for computing realistic synthetic strong ground motions. *Geophys Res Lett*, 1994;21(8):725-728.
11. Hartzell S, Harmsen S, Frankel A, Larsen S. Calculation of broadband time histories of ground motion: Comparison of methods and validation using strong-ground motion from the 1994 Northridge earthquake. *Bull Seismol Soc Am*, 1999;89(6):1484-1504.
12. Graves RW, Pitarka A. Broadband time history simulation using a hybrid approach. Vancouver, Canada: 13th World Conference on Earthquake Engineering; c2004.
13. Graves RW, Pitarka A. Broadband ground-motion simulation using a hybrid approach. *Bull Seismol Soc Am*, 2010;100(5A):2095-2123.
14. Graves RW, Pitarka A. Refinements to the Graves and Pitarka (2010) broadband ground-motion simulation method. *Seismol Res Lett*, 2015;86(1):75-80.
15. Bradley BA, Razafindrakoto HN, Polak V. Ground-motion observations from the 14 November 2016 M w 7.8 Kaikoura, New Zealand, earthquake and insights from broadband simulations. *Seismol Res Lett*, 2017;88(3):740-756.
16. Lee RL, Bradley BA, Stafford PJ, Graves RW, Rodriguez-Marek A. Hybrid broadband ground motion simulation validation of small magnitude earthquakes in Canterbury, New Zealand. *Earthquake Spectra*, 2020;36(2):673-699.
17. Taborra R, Roten D. Physics-based ground-motion simulation. *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg; c2015.
18. Mai PM, Imperatori W, Olsen KB. Hybrid broadband ground-motion simulations: Combining long-period deterministic synthetics with high-frequency multiple S-to-S backscattering. *Bull Seismol Soc Am*, 2010;100(5A):2124-2142.
19. Bradley BA, Pettinga D, Baker JW, Fraser J. Guidance on the utilization of earthquake-induced ground motion simulations in

- engineering practice, *Earthquake Spectra*, 2017;33(3):809–835.
20. Lee RL, Bradley BA. Progress toward New Zealand-wide hybrid broadband ground motion simulation validation. In *Pacific Conference on Earthquake Engineering*. 2019:4–6.
 21. Goulet CA, Bozorgnia Y, Abrahamson NA, Kuehn N, Al Atik L, Youngs RR, Graves RW, Atkinson GM. Central and eastern North America Ground-motion characterization (NGA-east) (No. DOE-UC-08314). Univ. of California, Berkeley, CA (United States); c2018.
 22. Goulet CA, Bozorgnia Y, Kuehn N, Al Atik L, Youngs RR, Graves RW, Atkinson GM. NGA-East ground-motion characterization model part I: Summary of products and model development. *Earthquake Spectra*. 2021;37:1231–1282.
 23. Rudman A, Douglas J, Tubaldi E. The assessment of probabilistic seismic risk using ground-motion simulations via a Monte Carlo approach. *Nat Hazard*. 2024;120(7):6833–6852.
 24. Kim SK, Song SG, Kyung JB. An analysis of intensity attenuation characteristics by physics-based strong ground-motion simulation. *J Kor Earth Sci Soc*. 2019;40(1):56–67.
 25. Lee J, Song JH, Kim S, Rhie J, Song SG. Three-dimensional seismic wave propagation simulations in the Southern Korean peninsula using pseudodynamic rupture models. *Bull Seismol Soc Am*. 2022;112(2):939–960.
 26. Komatitsch D, Tromp J. Introduction to the spectral element method for three-dimensional seismic wave propagation. *Geophys J Int*. 1999;139(3):806–822.
 27. Graves RW. Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences. *Bull Seismol Soc Am*. 1996;86(4):1091–1106.
 28. Brune JN. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J Geophys Res*. 1970;75(26):4997–5009.
 29. Campbell KW, Bozorgnia Y. NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10s. *Earthquake Spectra*, 2008;24(1):139–171.
 30. Noh M, Lee K. Estimation of peak ground motions in the southeastern part of the Korean peninsula (I) : Estimation of spectral parameters. *J Geol Soc Korea*. 1994;30(3):297–306.
 31. Jo ND, Baag CE. Estimation of spectrum decay parameter k and stochastic prediction of strong ground motions in southeastern Korea. *J Earthq Eng Soc Korea*. 2003;7(6):59–70.
 32. Leonard M. Earthquake fault scaling: Self-consistent relating of rupture length, width, average displacement, and moment release. *Bull Seismol Soc Am*. 2010;100(5A):1971–1988.
 33. Leonard M. Self-consistent earthquake fault-scaling relations: Update and extension to stable continental strike-slip faults. *Bull Seismol Soc Am*. 2014;104(6):2953–2965.
 34. Kim KH, Park JH, Park Y, Hao TY, Kim HJ. Crustal structure beneath the southern Korean Peninsula from local earthquakes. *Geophys J Int*. 2017;209(2):969–978.
 35. Kim S, Rhie J, Kim G. Forward waveform modelling procedure for 1-D crustal velocity structure and its application to the southern Korean Peninsula. *Geophys J Int*. 2011;185(1):453–468.
 36. Kim HS. Regional Surface Influence Study for Earthquake Observation Amplification Effect Correction. Final Report, Korea Meteorological Administration (KMA): Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources; c2020.
 37. Cho HI, Lee MG, Ahn JK, Sun CG, Kim HS. Site flatfile of Korea meteorological administration's seismic stations in Korea. *Bull Earthq Eng*. 2022;20:5775–5795.
 38. Emolo A, Sharma N, Festa G, Zollo A, Convertito V, Park JH, Chi HC, Lim IS. Ground-motion prediction equations for South Korea Peninsula. *Bull Seismol Soc Am*. 2015;105(5): 2625–2640.